

**This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

**Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.**

**Defects in the images may include (but are not limited to):**

- **BLACK BORDERS**
- **TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- **FADED TEXT**
- **ILLEGIBLE TEXT**
- **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- **COLORLED PHOTOS**
- **BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS**
- **GRAY SCALE DOCUMENTS**

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**



⑮ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 197 26 126 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 01 L 29/732**  
H 01 L 21/331  
H 01 L 21/263

②① Aktenzeichen: 197 26 126.4  
②② Anmeldetag: 20. 6. 97  
④③ Offenlegungstag: 24. 12. 98

**DE 197 26 126 A 1**

⑦① **Anmelder:**

TEMIC TELEFUNKEN microelectronic GmbH, 74072  
Heilbronn, DE

⑦② **Erfinder:**

Harmel, Hartmut, Dipl.-Phys., 74257  
Untereisesheim, DE; Schlangenotto, Heinrich, Dr.,  
63263 Neu-Isenburg, DE

⑤⑥ **Entgegenhaltungen:**

US 48 81 115  
US 40 47 976

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ **Bipolarer Schalttransistor mit verringerter Sättigung**

⑤⑦ Es wird ein bipolarer Schalttransistor beschrieben, der aus einer hoch dotierten Emittierzzone mit n-Leitfähigkeit, einer darauf folgenden Basiszone mit p-Leitfähigkeit, einer darauf folgenden schwach dotierten Kollektorzone mit n-Leitfähigkeit und einer sich daran anschließenden hoch dotierten Kollektorzone mit n-Leitfähigkeit besteht. Dabei ist die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger in der Basis und dem Bereich der schwach dotierten Kollektorzone bis nahe an den n<sup>+</sup>n<sup>+</sup>-Übergang heran sehr hoch. Um einen Schalttransistor für höhere Sperrspannungen zu schaffen, der eine starke Sättigung von sich aus verhindert und der bei Abschalten aus einem Zustand mit kleinem Kollektorstrom oder hohem Basisstrom nur geringe Verluste aufweist, ist eine Rekombinationsschicht innerhalb der schwach dotierten Kollektorzone an der Grenzschicht zur hoch dotierten Kollektorzone angeordnet, in der im Vergleich zur schwach dotierten Kollektorzone die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger um mindestens etwa zwei Zehnerpotenzen kleiner ist.

**DE 197 26 126 A 1**

## Beschreibung

Bipolartransistoren für höhere Sperrspannungen haben im allgemeinen eine npn-Struktur mit einer Kollektorzone, die in eine schwach dotierte N<sup>-</sup>-Zone zur Aufnahme der Spannung und eine darauf folgende hoch dotierte N<sup>+</sup>-Zone mit dem Kollektorkontakt unterteilt ist. Solche Transistoren betreibt man im eingeschalteten Zustand üblicherweise im Bereich der Quasisättigung nahe am Übergang zur Sättigung. Die schwach dotierte Kollektorzone ist dann bis auf einen schmalen Bereich in der Nähe des N<sup>-</sup>N<sup>+</sup>-Übergangs mit injizierten Ladungsträgern hoher Konzentration überschwemmt. Bei dieser Betriebsweise sind sowohl die Durchlaßverluste als auch die dynamischen Verluste klein. Nimmt der Kollektorstrom  $i_C$  bei gegebenem Basisstrom  $i_B$  nun ab, so geht der Transistor in den Zustand der Sättigung über, bei dem das Injektionsniveau auch am N<sup>-</sup>N<sup>+</sup>-Übergang hoch ist. Bei  $i_C \leq i_B$  wird die Löcherkonzentration am N<sup>-</sup>N<sup>+</sup>-Übergang annähernd so groß wie an der Basisseite der N<sup>-</sup>-Zone. Man spricht dann von starker Sättigung. Ein Übergang von der Quasisättigung in die Sättigung kann auch bei Erhöhung der Temperatur erfolgen, da der Stromverstärkungsfaktor mit der Temperatur zunimmt. Die Sättigung hat zwar eine geringere Kollektor-Emitter-Spannung  $V_{CE}$  und damit geringere Durchlaßverluste zur Folge. Jedoch treten beim Abschalten lange Abschaltzeiten und große Schaltverluste auf, so daß die Gesamtverluste bei hohen Frequenzen durch die Sättigung stark zunehmen. Von Bedeutung ist dabei, daß man die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger groß wählen muß, um einen hohen Stromverstärkungsfaktor zu erzielen. Da die Verluste mit der Temperatur ansteigen, kann es bei hohen Frequenzen zu einem unkontrollierten Hochlaufen der Temperatur (thermisches Weglaufen) und zur Zerstörung des Bauelements kommen.

Grundsätzlich ist für derartige Bauelemente auch eine pnp-Struktur möglich. Die N, N<sup>-</sup>, N<sup>+</sup> Schichten sind dann durch entsprechend dotierte P, P<sup>-</sup>, P<sup>+</sup> Schichten ersetzt. Nachfolgende Ausführungen lassen sich daher in analoger Weise auf eine komplementäre Struktur anwenden.

Um die Schaltverluste zu verkleinern, läßt man die Lebensdauer oft nicht bei dem sehr hohen Wert von z. B. 80 µs, den man nach den Hochtemperaturprozessen zur Erzeugung der Dotierungsstruktur beobachtet, sondern reduziert sie auf einen kleineren, aber immer noch hohen Wert von z. B. 20 µs, indem man den Halbleiter mit Elektronen hoher Energie bestrahlt. Die dadurch verursachte Verringerung des Stromverstärkungsfaktors kann man in bestimmten Grenzen kompensieren, indem man die Stromdichte durch eine Vergrößerung der aktiven Halbleiterfläche erniedrigt, da dies eine Erhöhung des Stromverstärkungsfaktors zur Folge hat. Jedoch hält sich die so erzielbare Verkleinerung der Schaltverluste in engen Grenzen, und der Anstieg der Verluste mit der Temperatur ist unverändert stark. Daher ist ein thermisches Weglaufen bei den gewünschten hohen Schaltfrequenzen oft nicht zu verhindern. Auch ist diese Maßnahme durch die damit verbundene Vergrößerung der Halbleiterfläche teuer.

Andererseits werden oft externe oder interne Beschaltungen verwendet, um eine starke Sättigung zu verhindern. Jedoch sind externe Beschaltungen ebenfalls kostenaufwendig und nehmen außerdem viel Raum in Anspruch. Es werden daher Transistoren angeboten, die solche Schaltungen monolithisch integriert enthalten. Bei Transistoren für niedrige Sperrspannung kann die Sättigung durch eine "Clamp-Diode" vom Schottky-Typ, die zwischen Basis und Kollektor angeordnet ist, weitgehend verhindert werden. Eine auch auf hochsperrende Transistoren anwendbare Methode besteht darin, daß der äußere Basisanschluß nur über einen in-

tegrierten Vorwiderstand mit der Basis des Transistors verbunden ist, andererseits aber unmittelbar mit dem P-Gebiet einer PN<sup>-</sup>N<sup>+</sup>-Diode, deren kathodenseitige Elektrode vom Kollektor des Transistors mitgebildet wird. Die Diode stimmt in ihrer vertikalen Struktur mit der Basis-Kollektor-Struktur des Transistors überein, ist lateral aber vom Transistor abgesetzt. Infolge des Spannungsabfalls am Basisvorwiderstand wird die Diode bei Übergang des Transistors in die Sättigung stark in Durchlaßrichtung gepolt. Daher fließt der äußere Basisstrom zum großen Teil durch die Diode ab, ohne den Transistor aufzusteuern, so daß eine starke Sättigung verhindert wird. Ein Nachteil ist, daß die Diode beim Abschalten des Transistors mit ausgeräumt werden muß und das Abschalten dadurch verzögert wird. Die Integration des Widerstandes und der Diode macht auch eine deutliche Vergrößerung der Chipfläche erforderlich. Auch die Steuerleistung und die Erwärmung des Chips ist infolge des Widerstandes erhöht. Seine Auslegung ist nur für einen bestimmten Basisstrom optimal.

Aus der GB 2 276 981 A ist es bekannt, den Emitteranschluß auch mit dem P-Gebiet einer PN<sup>-</sup>N<sup>+</sup>-Diode zu verbinden, die wie in obigem Fall durch die von der Basis getrennte P-Zone und die Kollektor-Struktur des Transistors gebildet wird. Die Diode liegt zur Kollektoremitterstrecke des Transistors antiparallel. Gleichzeitig wird durch die Basis und die an die Oberfläche tretende schwach dotierte Kollektorzone des Transistors sowie die P-Zone der Diode ein lateraler PNP-Transistor gebildet. Wird das Potential des Kollektors des Haupttransistors gegenüber der Basis negativ, so wird der PNP-Transistor durch Elektronenstrom aus dem Kollektor aufgesteuert. Infolgedessen fließt der äußere Basisstrom zum Teil zum Kollektor des PNP-Transistors ab, so daß der Haupttransistor weniger aufgesteuert wird. Für den so erzielten Antisättigungseffekt ist hier eine wesentliche Vergrößerung der Chipfläche erforderlich. Untersuchungen haben ferner ergeben, daß die Anordnung weniger effektiv ist, wenn die kollektorseitige N<sup>+</sup>-Zone durch eine tiefe Diffusion hergestellt ist (dreifach diffundierte Transistoren), was bei hoch sperrenden Transistoren die kostengünstigste Methode ist. Beim Abschalten aus der Sättigung bleibt bei diesen Transistoren ein Ladungsträgerberg am N<sup>-</sup>N<sup>+</sup>-Übergang zurück, der nicht schnell ausgeräumt wird und somit zu einem erhöhten Schweißstrom führt. Nachteilig ist ferner, daß der äußere Basisstrom auch im Zustand der Quasisättigung zum Teil zum Kollektorgebiet des PNP-Transistors abfließt, da dessen Emitterbasisübergang als Verlängerung des Basis Kollektorübergangs des Haupttransistors in Durchlaßrichtung gepolt ist. Dadurch wird der Stromverstärkungsfaktor reduziert.

Durch Bestrahlung mit Protonen oder  $\alpha$ -Teilchen können in Halbleiterbauelementen lokal begrenzte Schichten mit Rekombinationszentren erzeugt werden, deren Anwendung in "Archiv für Elektrotechnik", Bd. 72, 1989, S. 133-140, zusammenfassend beschrieben wird. Bei P<sup>+</sup>N<sup>-</sup>N<sup>+</sup>-Leistungsdioden wird durch eine Rekombinationsschicht am P<sup>+</sup>N<sup>-</sup>-Übergang ein weiches Recovery-Verhalten mit kleiner Rückstromspitze erreicht. Bei GTO-Thyristoren können der beim Abschalten auftretende Schweißstrom und die Abschaltverluste durch eine Rekombinationsschicht in der N-Basis in der Nähe des anodenseitigen P<sup>+</sup>N<sup>-</sup>-Übergangs wesentlich verringert werden. In dem Konferenzband des "International Symposium on Semiconductor Devices & ICs", ISPSD'96, 1996, S. 335-338, wird weiter die Anwendung der Protonen- und  $\alpha$ -Bestrahlung zur Reduzierung der Schaltverluste von IGBTs beschrieben, die eine N-Bufferzone vor der anodenseitigen P<sup>+</sup>-Zone aufweisen. Die Rekombinationsschicht soll hier in der N<sup>-</sup>-Zone kurz vor der N-Bufferzone liegen. Die Bestrahlung kann von der Vorder-

oder Rückseite der Halbleiterscheibe erfolgen. Da die Protonenbestrahlung mit einer im allgemeinen störenden n-Dotierung verbunden ist, wird in der praktischen Bauelementherstellung meistens die  $\alpha$ -Bestrahlung verwendet, hauptsächlich um schnelle Leistungsdioden mit weichem Rückstromabfall herzustellen.

Bei Bipolartransistoren ist die Protonen- und  $\alpha$ -Bestrahlung weder aus der Fachliteratur noch von der praktischen Bauelementherstellung her bekannt. Da die Lebensdauer der Ladungsträger bei Transistoren für höhere Sperrspannungen wie zuvor beschrieben hoch sein muß und sie durch die Protonen- und  $\alpha$ -Strahlen stark reduziert wird, wurde bisher keine Möglichkeit gesehen, dadurch die Eigenschaften dieser Transistoren zu verbessern.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen Schalttransistor für höhere Sperrspannungen zu schaffen, der eine starke Sättigung von sich aus verhindert und der bei Abschalten aus einem Zustand mit kleinem Kollektorstrom oder hohem Basisstrom nur geringe Verluste aufweist. Diese Ziele sollen ohne die Nachteile der bekannten Antisättigungsintegrationen erreicht werden. Es ist weiter Aufgabe der Erfindung, den Stromverstärkungsfaktor im Zustand der Quasisättigung zu erhöhen bzw. alternativ dazu die für einen vorgegebenen Stromverstärkungsfaktor erforderliche aktive Fläche zu verkleinern.

Die erfindungsgemäße Lösung dieser Aufgabe besteht darin, die Lebensdauer in der Basis und dem benachbarten Bereich der schwach dotierten Kollektorzone bis zu einem Punkt nahe am  $N^-N^+$ -Übergang allein mit Rücksicht auf einen hohen Stromverstärkungsfaktor, d. h. sehr groß, einzustellen, in einem engen Bereich vor dem  $N^-N^+$ -Übergang aber um mindestens etwa zwei Zehnerpotenzen kleiner. Die Zone kleiner Lebensdauer wird vorzugsweise durch Protonenbestrahlung von der Rückseite der Scheibe her erzeugt.

Die Vorteile der Erfindung bestehen darin, daß die Verluste bei Abschalten aus einem Zustand kleinen Kollektorstroms wesentlich niedriger sind als bei bekannten Transistoren und daß sie wesentlich weniger mit der Temperatur ansteigen. Gegenüber Transistoren mit Antisättigungsintegration sind die Vorteile besonders groß, wenn die kollektorseitige  $N^+$ -Zone durch eine tiefe Diffusion hergestellt ist. Gleichzeitig wird der Stromverstärkungsfaktor bei Nennbetrieb (Kollektorstrom groß gegen Basisstrom) durch den großen Lebensdauerwert in der  $N^-$ -Zone außerhalb der Rekombinationsschicht, mit dem keine Rücksicht auf kleine Schaltverluste genommen wird, heraufgesetzt. Bei vorgegebenem Mindeststromverstärkungsfaktor kann die Stromdichte erhöht und damit die Chipfläche für gegebenen Kollektorstrom wesentlich kleiner gewählt werden als bei bekannten Transistoren. Weiterhin kann auch der mit der Protonenbestrahlung verbundene Dotierungseffekt genutzt werden, um den Stromverstärkungsfaktor bei gegebenem  $V_{CE}$  zu erhöhen und den sicheren Arbeitsbereich (SOA-Bereich) zu vergrößern. Bei epitaktischen  $N^-N^+$ -Strukturen kann eine N-Bufferzone zwischen der  $N^-$ -Schicht und der  $N^+$ -Kollektorzone, die zur Vergrößerung des SOA-Bereichs verwendet wird, in der Regel entfallen.

#### Kurze Beschreibung der Figuren

Fig. 1a zeigt die Halbzelle eines streifenförmigen Transistors im Querschnitt;

Fig. 1b zeigt das Lebensdauerprofil in einem bekannten Transistor und einem Transistor nach der Erfindung;

Fig. 2 zeigt ein vertikales Dotierungsprofil zusammen mit Ladungsträgerverteilungen im eingeschalteten Zustand (Kurven A, B und C). Es gelten

Kurve A bei Nennbetrieb ( $i_C = 10i_B = 100 \text{ mA/cm}$ ) sowohl

für den bekannten als auch für den erfindungsgemäßen Transistor;

Kurve B bei reduziertem Kollektorstrom ( $i_C = i_B = 10 \text{ mA/cm}$ ) für den bekannten Transistor;

5 Kurve C bei reduzierten Kollektorstrom ( $i_C = i_B = 10 \text{ mA/cm}$ ) für den Transistor nach der Erfindung;

Fig. 3a zeigt die Ladungsträgerverteilungen bei Abschalten aus kleinem Kollektorstrom in einem bekannten Transistor zu verschiedenen Zeitpunkten;

10 Fig. 3b zeigt die Ladungsträgerverteilungen bei Abschalten aus kleinem Kollektorstrom in einem erfindungsgemäßen Transistor zu verschiedenen Zeitpunkten;

Fig. 4a zeigt die Stromverläufe bei Abschalten aus kleinem Kollektorstrom in einem bekannten Transistor in einer ohmschen Testschaltung;

15 Fig. 4b zeigt die Stromverläufe bei Abschalten aus kleinem Kollektorstrom in einem erfindungsgemäßen Transistor in einer ohmschen Testschaltung;

20 Fig. 5 zeigt vertikale Dotierungsprofile des Transistors gemessen nach der Spreading-Resistance-Methode für zwei verschiedene Energien der Bestrahlung.

Fig. 1a zeigt den Querschnitt einer Halbzelle eines streifenförmigen Transistors. Auf eine hoch dotierte  $N^+$ -Kollektorzone 1, die mit einer Kollektormetallisierung C versehen ist, folgt die schwach dotierte  $N^-$ -Kollektorzone 2, an die sich die p-leitende Basiszone 3 anschließt, in die in einem Teilbereich der Fläche die  $N^+$ -Emitterzone 4 eingebettet ist. Die Emitterzone ist mit einer Metallisierung und einem Emitteranschluß E versehen, ebenso ist die Basiszone 3 in dem nicht von der Emitterzone bedeckten Bereich mit einer Metallisierung und einem Basisanschluß B versehen. Diese Dotierungsstruktur kann im Transistor nach dem Stand der Technik und dem erfindungsgemäßen Transistor weitgehend gleich sein. Letzterer unterscheidet sich vom bekannten Transistor aber dadurch, daß sich in der schwach dotierten  $N^-$ -Kollektorzone am Übergang zur hoch dotierten Kollektorzone eine Rekombinationsschicht 5 angeordnet ist, die in der Fig. 1a schraffiert eingezeichnet ist. Innerhalb der Rekombinationsschicht 5 nimmt die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger um mindestens etwa zwei Zehnerpotenzen ab.

In Fig. 1b ist das vertikale Profil der Lebensdauer  $\tau$  der Ladungsträger in einem bekannten (gestrichelte Linie) und einem erfindungsgemäßen Transistor (durchgezogene Linie) mit der Dotierungsstruktur nach Fig. 1a aufgetragen. Genauer ist die Lebensdauer  $\tau$  dabei in der  $N^-$ -Zone als die Lebensdauer bei hoher Injektion definiert, da diese die Rekombination dort bestimmt. Wie es die gestrichelte Linie zeigt, hat die Lebensdauer  $\tau$  im bekannten Transistor über die ganze  $N^-$ -Zone hinweg und noch ein Stück in die  $N^+$ -Kollektorzone hinein einen konstanten hohen Wert entsprechend einer konstanten Rekombinationszentrendichte. Im vorliegenden Fall beträgt die Lebensdauer  $20 \mu\text{s}$ . Im Transistor nach der Erfindung ist die Lebensdauer im überwiegenden Teil der  $N^-$ -Zone ebenfalls groß und in dem in der Fig. 1b dargestellten, bevorzugten Fall sogar größer als im bekannten Transistor. Am kollektorseitigen Ende der  $N^-$ -Zone aber ist sie über einen Bereich von etwa  $10 \mu\text{m}$  um etwa drei Zehnerpotenzen abgesenkt, um dann im  $N^+$ -Gebiet wieder etwas anzustreigen. Es befindet sich also am kollektorseitigen Ende des  $N^-$ -Gebietes eine Rekombinationsschicht 5. Ein solches Profil der Lebensdauer  $\tau$  kann man durch Protonen- oder  $\alpha$ -Teilchenbestrahlung von der Kollektor- oder Rückseite der Halbleiterscheibe aus erzeugen. Dabei ist die Bestrahlungsenergie so einzustellen, daß die Reichweite der Strahlung der Tiefe entspricht, in der die Lebensdauer erniedrigt werden soll. Die Bestrahlungsdosis zusammen mit der Temperatur und Zeitdauer des darauf folgenden Aus-

heilprozesses bestimmen den Grad der Lebensdauerabsenkung.

Die Rekombinationsschicht 5 mit kleiner Lebensdauer soll im eingeschalteten Zustand bei Nennbetrieb nicht mit Ladungsträgern überschwemmt werden. Damit die Kollektoremitterspannung trotzdem nicht zu groß wird, z. B. nicht größer als 2 V, muß die Dicke der Rekombinationsschicht 5 genügend klein sein. Die genauere Bedingung ist, daß die Dicke dieser Schicht multipliziert mit ihrem unmodulierten spezifischen Widerstand und der Nennstromdichte nur einen Spannungsabfall ergeben soll, der im Regelfall nicht größer als etwa 1 V bis 1.5 V ist.

Die Wirkung der Rekombinationsschicht 5 wird vor allem durch ihre Rekombinationsgeschwindigkeit  $s$  bestimmt, die als Integral der reziproken Lebensdauer über die Dicke definiert ist. Beim erfindungsgemäßen Transistor soll die Rekombinationsgeschwindigkeit  $s$  größer als etwa 5000 cm/s sein. Eine zusätzliche Festlegung wird weiter unten angegeben.

Die Rekombinationsschicht 5 kann sich auch in das  $N^+$ -Gebiet hinein erstrecken. Jedoch ist im wesentlichen nur der im  $N^-$ -Gebiet liegende Teil wirksam, da die Konzentration der Minoritätsladungsträger im  $N^+$ -Gebiet klein ist. Bei Festlegungen der Rekombinationsgeschwindigkeit  $s$  bezieht sich diese daher nur auf den im  $N^-$ -Gebiet liegenden Teil der Rekombinationsschicht 5. Bei diffundiertem  $N^+$ -Kollektorgebiet und somit graduelltem Übergang zwischen  $N^-$ - und  $N^+$ -Gebiet wird die Grenze zwischen beiden in diesem Zusammenhang so definiert, daß die Dotierungskonzentration dort  $1 \cdot 10^{15}/\text{cm}^3$  beträgt. Ein hinter dieser Grenze liegender Teil der Rekombinationsschicht ist nur stark vermindert wirksam (siehe Fig. 2).

Das vertikale Dotierungsprofil eines bekannten und erfindungsgemäßen Transistors in einem durch den Emitter verlaufenden Schnitt ist in Fig. 2 aufgetragen. Es handelt sich um einen dreifach diffundierten Transistor mit einer Sperrfähigkeit der Basis-Kollektorstruktur,  $V_{\text{CBO}}$ , von etwa 1700 V. Auch Elektronen- und Löcherverteilungen, die für verschiedene Fälle im eingeschalteten Zustand durch numerische Simulation berechnet wurden, sind eingezeichnet (Kurven A, B, C). Bei einem Kollektorstrom pro Emitterrandlänge von 100 mA/cm und einem 10fach kleineren Basisstrom (Stromverstärkung  $\beta = 10$ ) ergibt sich für den bekannten und den erfindungsgemäßen Transistor die gleiche durch die Kurve A gegebene Ladungsträgerverteilung. Die Lebensdauer in dem von der Leitfähigkeitsmodulation erfaßten Teil der  $N^-$ -Zone ist dabei in beiden Fällen gleich 20 ms. Die  $N^-$ -Zone ist von der Emitterseite her mit Elektronen und Löchern überschwemmt mit einer Konzentration, die hoch ist gegenüber der Dotierung. Nur ein kleiner Bereich am  $N^+N^-$ -Übergang rechts der gestrichelten Linie ist nicht von der Leitfähigkeitsmodulation erfaßt. Der Transistor befindet sich somit im Zustand der Quasisättigung, jedoch ist die Kollektoremitterspannung wegen der geringen Dicke des unmodulierten Gebiets noch gering, und zwar etwa gleich 1.5 V in diesem Fall.

Bei Erniedrigung des Kollektorstroms geht der Transistor bei gegebenem Basisstrom bald in die Sättigung. Die Sättigungsverteilung in dem bekannten Transistor bei einer um den Faktor 10 reduzierten Kollektorstromdichte und unverändertem Basisstrom ist in Fig. 2 als Kurve B eingezeichnet. Der Kollektor- und Basisstrom sind gleich und betragen pro Emitterrandlänge 10 mA/cm. Wie zu erkennen, ist die Injektion nun in der ganzen  $N^-$ -Zone bis in die  $N^+$ -Zone hinein hoch. Wie oben beschrieben, hat das hohe Abschaltverluste zur Folge. Dabei ist die Lebensdauer mit 20  $\mu\text{s}$  schon wesentlich niedriger angenommen, als man sie mit Rücksicht auf einen hohen Stromverstärkungsfaktor allein wählen

würde.

Die Kurve C in Fig. 2 gilt für den erfindungsgemäßen Transistor bei einem bis auf den Basisstrom reduzierten Kollektorstrom. Hierbei ist die Lebensdauer in der Schicht zwischen  $y = 140$  und  $150 \mu\text{m}$  auf einen Wert von 50 ns reduziert, während sie im übrigen Teil der  $N^-$ -Zone wie bei den Kurven A und B 20  $\mu\text{s}$  beträgt. Wie für Kurve B betragen die Ströme pro Emitterrandlänge 10 mA/cm. Wie zu erkennen, ist die Ladungsträgerkonzentration in der Umgebung des  $N^+N^-$ -Übergangs nun ungefähr um eine Zehnerpotenz kleiner als am Übergang zur P-Zone und auch hier noch deutlich kleiner als für den bekannten Transistor.

In Fig. 3a, 3b ist dargestellt, wie die Ladungsträgerkonzentration in der  $N^-$ -Zone des bekannten (Fig. 3a) und des erfindungsgemäßen Transistors (Fig. 3b) beim Abschalten abgebaut wird. Die für die verschiedenen Zeitpunkte angegebenen Ladungsträgerverteilungen wurden für den Fall berechnet, daß mit negativem Basisstrom, der die Größe des positiven Basisstroms im eingeschalteten Zustand hat, gegen eine äußere Spannung von 300 V abgeschaltet wird, wobei die Last als ohmsch angenommen ist. Im eingeschalteten Zustand, der bis zur Zeit  $t = 0$  gilt, ist die gespeicherte Ladung  $Q = q \int p dx$  im Transistor nach der Erfindung um den Faktor 2.7 kleiner als im bekannten Transistor. Diese Ladung wird im erfindungsgemäßen Transistor beim Abschalten mit gleichem negativen Basisstrom entsprechend schneller ausgeräumt. Außer der kleineren anfänglichen Speicherladung wirkt sich beim Transistor nach der Erfindung auch günstig aus, daß während des Abschaltvorgangs viele Elektronen und Löcher zur Rekombinationsschicht fließen und dort rekombinieren. Das ist in Fig. 3b am Gradient der Ladungsträgerkonzentrationen zur Rekombinationsschicht hin zu erkennen. Der pn-Übergang zwischen Basis und  $N^-$ -Kollektorzone ist beim bekannten Transistor nach 9  $\mu\text{s}$ , beim erfindungsgemäßen Transistor nach etwa 2.5  $\mu\text{s}$  von Ladungsträgern frei geräumt und beginnt zu sperren. Die dadurch definierte Speicherzeit ist demnach um den Faktor 3.6 reduziert. Auch die darauf folgende Phase der Fallzeit, in der die Spannung am Bauelement ansteigt und der Kollektorstrom abfällt, ist stark herabgesetzt.

In Fig. 4 sind die zu Fig. 3 gehörigen Verläufe von Kollektor- und Basisstrom aufgeplottet. Die starke Verkleinerung der Abschaltzeit beim erfindungsgemäßen Transistor tritt unmittelbar in Erscheinung. Die Verkürzung der Speicherzeit, während welcher der Kollektorstrom noch konstant bleibt, ist unter anderem deshalb erwünscht, weil die ohmschen Verluste in Schaltungen dadurch oft verkleinert werden. Die Verluste im Transistor entstehen überwiegend während der Fallphase, in der Strom und Spannung gleichzeitig hoch sind. Im Fall des in Fig. 4 gezeigten Ausführungsbeispiels sind die Abschaltverluste im erfindungsgemäßen Transistor um den Faktor 3.5 kleiner als im bekannten Transistor.

Ein wichtiger Vorteil des Transistors nach der Erfindung besteht darin, daß die Abschaltverlustarbeit zum Unterschied von üblichen Transistoren nur sehr wenig mit der Temperatur ansteigt, wie Messungen zeigen. Dies liegt in der Hauptsache darin begründet, daß die Rekombinationsgeschwindigkeit  $s$  zwar mit zunehmender Temperatur abnimmt, jedoch bei der angegebenen Festlegung auch bei erhöhter Temperatur, z. B.  $150^\circ\text{C}$ , immer noch groß genug ist, um die Abschaltverluste nahe ihrem Minimum zu halten. Daß die durch die Protonenbestrahlung eingestellte Lebensdauer an sich schon weniger von der Temperatur abhängt als bei Elektronenbestrahlung, kommt als Nebeneffekt noch hinzu.

In den Fig. 2 bis 4 war die Lebensdauer in der  $N^-$ -Zone des erfindungsgemäßen Transistors außerhalb der Rekombi-

nationsschicht wie im bekannten Transistor gleich 20  $\mu\text{s}$  gesetzt, um allein den Einfluß der Rekombinationsschicht zu demonstrieren. Bevorzugt wird die Lebensdauer in dem nicht zur Rekombinationsschicht gehörenden Teil der N<sup>-</sup>-Zone aber größer gewählt, als man sie im bekannten Transistor mit Rücksicht auf die Schaltverluste wählen würde. Im erfindungsgemäßen Transistor wählt man sie beispielsweise 70  $\mu\text{s}$ , verglichen mit 20  $\mu\text{s}$  im bekannten. Dadurch erhält man bei gegebener Kollektor-Emitter-Spannung  $V_{CE}$  und gegebener Kollektorstromdichte  $j_C$  einen höheren Stromverstärkungsfaktor. Dies kann man auch in der Weise nutzen, daß man die Kollektorstromdichte erhöht und den Stromverstärkungsfaktor auf den alten Wert einstellt. Somit benötigt man bei gleichem Stromverstärkungsfaktor für den gleichen Strom eine kleinere aktive Halbleiterfläche, so daß, abgesehen von den großen Vorteilen der Rekombinationsschicht für das Schaltverhalten, außerdem die Fertigungskosten reduziert werden.

Um zu einer weiteren Spezifizierung der Rekombinationsschicht zu kommen, kann man ihre Dicke als klein gegen die Dicke  $w$  der N<sup>-</sup>-Zone voraussetzen. Bei verschwindendem Kollektorstrom und gegebenen positiven Basisstrom gilt dann für den Elektronen- und Löcherteilchenstrom, der in die Rekombinationsschicht fließt,

$$D \cdot \frac{p_p - p_n}{w} = s \cdot p_n.$$

Dabei bedeuten  $p_p$ ,  $p_n$  die Löcherkonzentration in der N<sup>-</sup>-Zone an der Basisseite bzw. der N<sup>+</sup>-Kollektorseite (in der Rekombinationsschicht),  $D$  die ambipolare Diffusionskonstante und  $s$  die Rekombinationsgeschwindigkeit der Rekombinationsschicht. Die ambipolare Diffusionslänge in der N<sup>-</sup>-Zone wird dabei größer als die Dicke  $w$  vorausgesetzt. Aus der Forderung, daß die Konzentration  $p_n$  an der Rekombinationsschicht klein gegenüber  $p_p$  sein soll, erhält man aus obiger Gleichung die Bedingung  $s \gg D/w$ . Unter Berücksichtigung des numerischen Wertes für  $D$  in Silizium kann man dies umschreiben in

$$s \geq \frac{100 \text{ cm}^2 / \text{s}}{w}.$$

Bei dieser Wahl der Rekombinationsgeschwindigkeit ist die injizierte Ladungsträgerkonzentration am N<sup>+</sup>-Übergang im eingeschalteten Zustand auch bei verschwindendem oder geringem Kollektorstrom klein, so daß Sättigungseffekte weitgehend eliminiert sind.

Experimentelle Untersuchungen ergaben, daß Protonenbestrahlung mit einer Fluenz in dem Bereich  $3 \cdot 10^{11}/\text{cm}^2$  bis  $3 \cdot 10^{12}/\text{cm}^2$  in Verbindung mit einer nachfolgenden kurzen Ausheilung besonders geeignet ist, eine Rekombinationsschicht mit den gewünschten Eigenschaften zu erzeugen. Aber auch etwas außerhalb dieses Bereichs liegende Bestrahlungsdosen führen bei passender Ausheilung zu guten Ergebnissen. Da die zu durchstrahlende N<sup>+</sup>-Kollektorzone bei Transistoren relativ dick ist ( $> 150 \mu\text{m}$ ), muß die Protonenenergie entsprechend hoch gewählt werden, in der Regel größer als 4 MeV. Auf die Protonenbestrahlung folgt ein Prozeßschritt zur Ausheilung. Dieser findet vorteilhaft bei 300–400°C und einer Zeitdauer von 5–20 Minuten statt.

Im Prinzip kann die Rekombinationsschicht auch durch Bestrahlung mit Teilchen erzeugt werden. Die erforderlichen Energien, die infolge der höheren Teilchenladung bei gegebener Dicke der N<sup>+</sup>-Kollektorzone benötigt wird, müssen entsprechend der gewünschten Eindringtiefe angepaßt

werden. Im Gegensatz zur Bestrahlung mit Protonen tritt bei der Bestrahlung mit  $\alpha$ -Teilchen kein zusätzlicher Dotierungseffekt auf. Bei Transistoren mit PNP-Struktur ist das sogar von Vorteil.

Wie schon erwähnt, ruft die Protonenbestrahlung außer der Rekombinationsschicht auch eine Leitfähigkeitsdotierung vom n-Typ in dieser Schicht hervor. Während die Dotierungsschicht bei Dioden die Durchbruchspannung reduziert, da sie am pn-Übergang liegt, kann sie beim Transistor nach der Erfindung genutzt werden, um dessen Schalteigenschaften weiter zu verbessern. Die Bestrahlungsenergie und -dosis werden dazu so gewählt, daß die erzeugte zusätzliche n-Leitfähigkeit noch deutlich in der N<sup>-</sup>-Zone vor dem N<sup>+</sup>-Kollektorgebiet liegt und die Gesamtdotierung dort etwa um den Faktor 2 bis 10 erhöht. Hierdurch wird erreicht, daß bei Nennbetrieb, bei dem diese Schicht nicht mit Ladungsträgern überschwemmt ist, die Kollektoremitterspannung  $V_{CE}$  bei gegebenem Stromverstärkungsfaktor  $h_{FE}$  reduziert oder der Stromverstärkungsfaktor  $h_{FE}$  bei gegebenem  $V_{CE}$  erhöht wird.

Zu einem weiteren wichtigen Vorteil kann der Dotierungseffekt bei Transistoren mit epitaktischer N<sup>+</sup>-Struktur genutzt werden. Solche Transistoren besitzen nur einen kleinen SOA-Bereich. Um den SOA-Bereich zu vergrößern, wird zwischen der schwach und der hoch dotierten Kollektorzone oft eine Bufferzone mittlerer Dotierung angeordnet. Dadurch kann ein zweiter Durchbruch, der bei höheren Stromdichten und Spannungen durch zu hohe Feldstärke am N<sup>+</sup>-Übergang hervorgerufen wird, verhindert oder zu höheren Strom- und Spannungswerten hinausgeschoben werden. In einer Ausgestaltung der Erfindung wird nun die durch die Protonenbestrahlung erzeugte Dotierungsschicht genutzt, um ohne die epitaktische Bufferzone bekannter Transistoren einen ähnlichen SOA-Bereich zu erreichen. Das hat den Vorteil, daß von kostengünstigeren Wafern ausgegangen werden kann und zusätzlich die beschriebenen Verbesserungen durch die Rekombinationsschicht erzielt werden.

In einer Ausgestaltung der Erfindung wird nun die epitaktische Bufferzone fortgelassen und die durch die Protonenbestrahlung erzeugte Dotierungsschicht genutzt, um einen ähnlichen SOA-Bereich zu erreichen. Das hat den Vorteil, daß die Ausgangswafer billiger sind und zusätzlich die beschriebenen Verbesserungen durch die Rekombinationsschicht erzielt werden. In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird mit zwei oder mehreren verschiedenen Energien bestrahlt, die sich jeweils um etwa 100 bis 150 keV unterscheiden. Infolge der verschiedenen Reichweite der einzelnen Anteile kann so eine relativ homogene Dotierung in der Rekombinationsschicht erreicht werden.

Die Fig. 5 zeigt vertikale Dotierungsprofile eines Transistors nach der Erfindung für zwei verschiedene Energien der Bestrahlung. Die Profile wurden nach der Spreading-Resistance-Methode gemessen. Die Energien betragen bei dem angegebenen Ausführungsbeispiel bei einer Dicke der hochdotierten Kollektorzone 1 von ca. 180  $\mu\text{m}$  4.45 MeV (gestrichelte Linie in Fig. 5) und 4.6 MeV (durchgezogene Linie in Fig. 5), die Bestrahlungsdosis war  $1 \cdot 10^{12}/\text{cm}^2$ . Die beiden verwendeten Bestrahlungsenergien unterscheiden sich hier um 150 keV. Der Absolutwert muß im Einzelfall an die Dicke der N<sup>+</sup>-Zone und des Kollektorkontakts angepaßt werden. Im diesem Fall ist die Dotierungskonzentration im Bereich der Rekombinationsschicht bis etwa um den Faktor 4 erhöht, wie die Figur zeigt. Durch Überlagerung der beiden durch die Bestrahlung erzeugten Dotierungsverläufe ergibt sich ein der N<sup>+</sup>-Zone vorgelagerter Bereich  $140 < X < 160 \mu\text{m}$  mit annähernd konstanter erhöhter Dotierungskonzentration von etwa  $2 \cdot 10^{14}/\text{cm}^3$ . Dies führt zu den oben er-

wählten Verbesserungen.

#### Patentansprüche

1. Bipolarer Schalttransistor bestehend aus einer hoch dotierten Emitterzone (4) mit n-Leitfähigkeit, einer darauf folgenden Basiszone (3) mit p-Leitfähigkeit, einer darauf folgenden schwach dotierten Kollektorzone (2) mit n-Leitfähigkeit und einer sich daran anschließenden hoch dotierten Kollektorzone (1) mit n-Leitfähigkeit, wobei die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger in der Basis und dem Bereich der schwach dotierten Kollektorzone bis nahe an den Übergang zur hoch dotierten Kollektorzone (1) heran sehr hoch ist **dadurch gekennzeichnet**, daß eine Rekombinationsschicht (5) innerhalb der schwach dotierten Kollektorzone (2) an der Grenzschicht zur hoch dotierten Kollektorzone (1) angeordnet ist, in der im Vergleich zur schwach dotierten Kollektorzone (2) die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger um mindestens etwa zwei Zehnerpotenzen kleiner ist.
2. Bipolarer Schalttransistor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die hoch dotierte Kollektorzone (1) und schwach dotierte Kollektorzone (2) p-Leitfähigkeit, die Basiszone (3) n-Leitfähigkeit und die hoch dotierten Emitterzone (4) p-Leitfähigkeit aufweisen.
3. Bipolarer Schalttransistor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke der Rekombinationsschicht (5) in der schwach dotierten Kollektorzone (2) multipliziert mit dem spezifischen Widerstand und der Nennstromdichte einen Spannungsabfall von höchstens 1.5 V ergibt.
4. Bipolarer Schalttransistor nach einem der Ansprüche 1–3, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke der Rekombinationsschicht (5) kleiner als 20 µm ist.
5. Bipolarer Schalttransistor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Integral s der reziproken Trägerlebensdauer über die Rekombinationsschicht (Rekombinationsgeschwindigkeit) größer als 5000 cm/s ist.
6. Bipolarer Schalttransistor nach einem der Ansprüche 1–5, dadurch gekennzeichnet, daß die Rekombinationsgeschwindigkeit s der Rekombinationsschicht (5) der Bedingung genügt:

$$s \geq \frac{100 \text{ cm}^2 / \text{s}}{w},$$

wobei w die Dicke der schwach dotierten Kollektorzone (2) bezeichnet.

7. Verfahren zum Herstellen eines bipolaren Schalttransistors nach einem der Ansprüche 1–6, dadurch gekennzeichnet, daß die hoch dotierte Kollektorzone (1) durch Diffusion hergestellt ist.
8. Verfahren zum Herstellen eines bipolaren Schalttransistors nach einem der Ansprüche 1–7, dadurch gekennzeichnet, daß die Rekombinationsschicht (5) durch Protonenbestrahlung erzeugt wird.
9. Verfahren zum Herstellen eines bipolaren Schalttransistors nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Protonenbestrahlung von der Rückseite der Halbleiterscheibe erfolgt.
10. Verfahren zum Herstellen eines bipolaren Schalttransistors nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Fluenz der Protonenbestrahlung in dem Bereich  $3 \cdot 10^{11}$  bis  $3 \cdot 10^{12}/\text{cm}^2$  liegt.

11. Verfahren zum Herstellen eines bipolaren Schalttransistors nach einem der Ansprüche 8–10, dadurch gekennzeichnet, daß mit Protonen einer einzigen Energie bestrahlt wird.

12. Verfahren zum Herstellen eines bipolaren Schalttransistors nach einem der Ansprüche 8–10, dadurch gekennzeichnet, daß mit Protonen zweier oder mehrerer unterschiedlicher Energien zur Homogenisierung des Dotierungseffektes bestrahlt wird.

13. Verfahren zum Herstellen eines bipolaren Schalttransistors nach einem der Ansprüche 10–12, dadurch gekennzeichnet, daß sich auf die Protonenbestrahlung ein Prozeßschritt zur Ausheilung bei 300–400°C und einer Zeitdauer von 5–30 Minuten anschließt.

14. Verfahren zum Herstellen eines bipolaren Schalttransistors nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Rekombinationsschicht (5) durch Bestrahlen mit α-Teilchen erzeugt wird.

---

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

---

FIG.1a

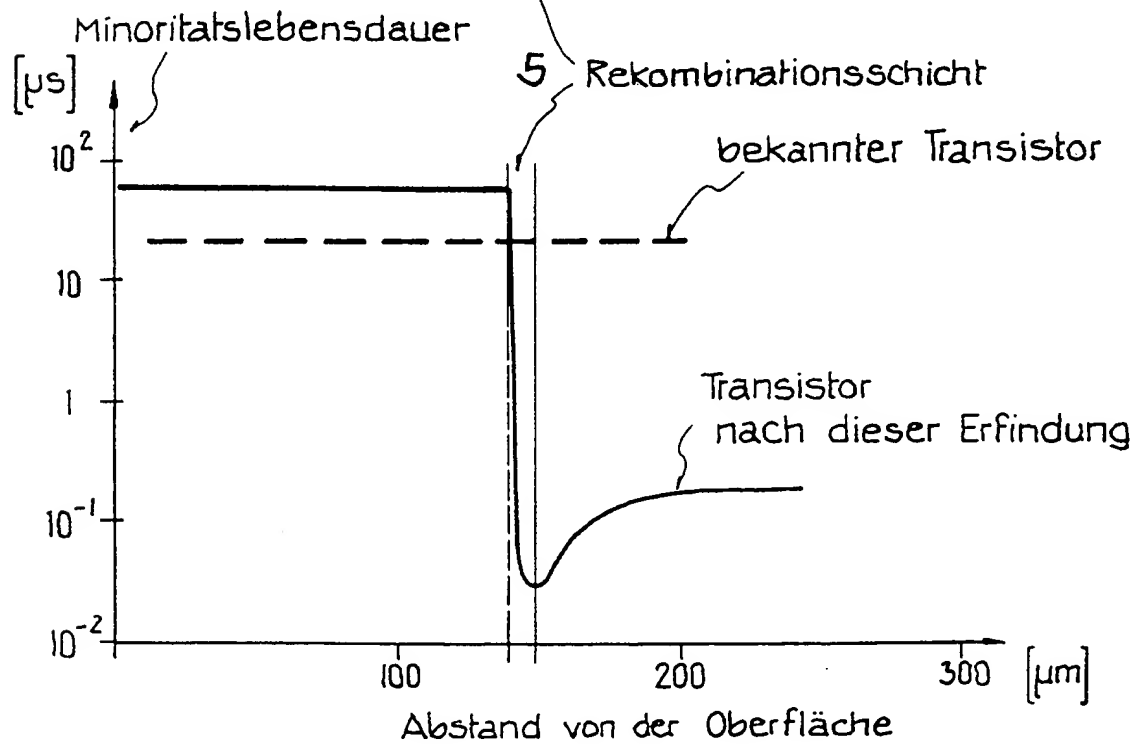
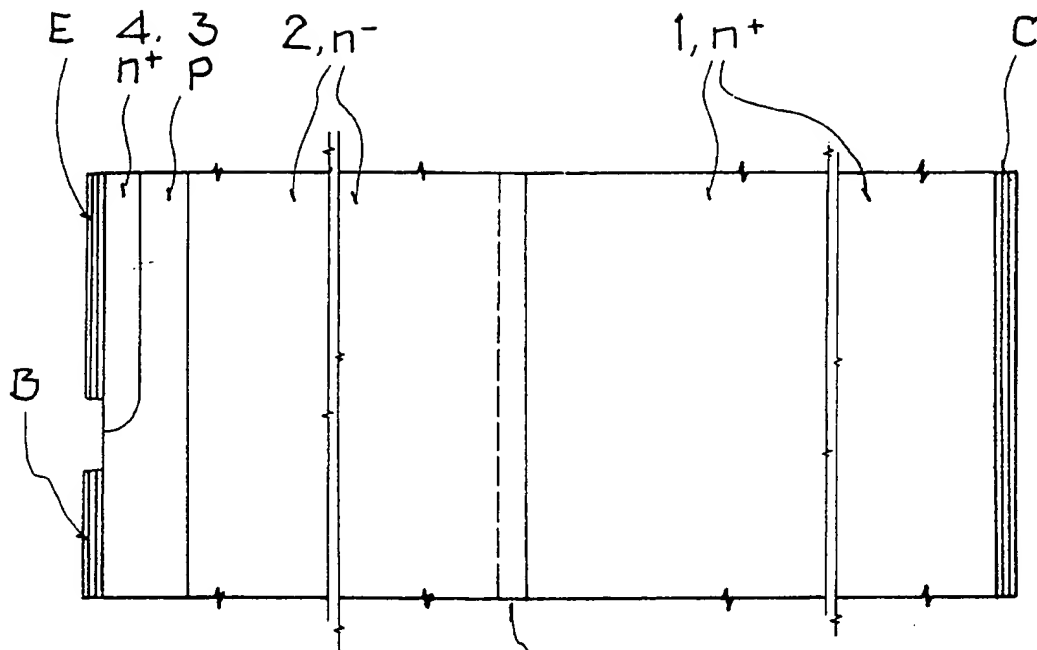


FIG.1b



